JAEA-Technology 2017-012 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-012



高温工学試験研究炉HTTRにおける溶融ワイヤを 用いた制御棒温度計測技術の開発

Development of Temperature Measurement Technology for Control Rod using Melt Wire in High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)

> 濱本 真平 澤畑 洋明 鈴木 尚 石井 俊晃 柳田 佳徳

Shimpei HAMAMOTO, Hiroaki SAWAHATA, Hisashi SUZUKI, Toshiaki ISHII and Yoshinori YANAGIDA

原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

Department of HTTR Oarai Research and Development Center Sector of Nuclear Science Research

June 2017

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

JAEA-Technology 2017-012

高温工学試験研究炉 HTTR における溶融ワイヤを用いた

制御棒温度計測技術の開発

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

濱本 真平, 澤畑 洋明, 鈴木 尚, 石井 俊晃, 柳田 佳徳*

(2017年3月31日 受理)

高温工学試験研究炉(HTTR)の制御棒が原子炉運転中に到達する最高温度を測定するため、 制御棒先端に融点の異なる合金ワイヤを設置し、原子炉出力 100%の状態から原子炉スクラムを 経験した後、ワイヤを制御棒から取出し、ワイヤの溶融状態を確認する体系を構築することとした。

本研究で溶融ワイヤを取出すための取出し装置を作製した。取出し装置は、想定どおりに機能 し、マニュピレータを用いた遠隔での溶融ワイヤを安全、かつ確実に実施することができ,かつ溶 融ワイヤの外観観察も明瞭に実施できたことから、制御棒温度計測技術の開発に成功した。

ワイヤの外観を観察した結果、融点が505℃以下の融解線が融解し、融点が651℃以上の融解 線が融解していないことが確認された。したがって、制御棒先端の最高到達温度は、505~651℃ の範囲にあること、すなわち制御棒は、反応炉スクラム時であっても、制御棒被覆材のAlloy 800H の使用温度基準(900℃)の範囲内で使用できていることが分かった。

大洗研究開発センター: 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 ※ 技術開発協力員

JAEA-Technology 2017-012

Development of Temperature Measurement Technology for Control Rod using Melt Wire in High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)

Shimpei HAMAMOTO, Hiroaki SAWAHATA, Hisashi SUZUKI, Toshiaki ISHII and Yoshinori YANAGIDA^{**}

Department of HTTR, Oarai Research and Development Center Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2017)

A melt wire was installed at the tip of the control rod in order to measure the temperature of High Temperature engineering Test Reactor (HTTR). After experience with reactor scram from the state of reactor power 100%, the melt wire was taken out from the control rod and appearance has been observed visually.

In this study, an exclusive device for taking out the melt wire was prepared. The take-out device functions as expected, and the melt wire was safely and reliably taken out using a remote manipulator. And because the visual observation of the melt wire was clearly carried out, we were successful in developing the control rod temperature measurement technology.

It was confirmed that the melt wires with a melting point of 505 °C or less were melted, and the melt wires with a melting point of 651 °C or more were not melted. Therefore, it was found that the highest arrival temperature of tip of the control rods where the melt wires are installed reaches within the range of 505 to 651 °C. And it was found that the control rod temperature at the time of reactor scram does not exceed the using temperature criteria (900 °C) of Alloy 800H of the control rod sleeve.

Keywords: HTTR, HTGR, VHTR, Melt Wire, Control Rod, Temperature Measurement, High Temperature

* Collaborating Engineer

目次

1. 序論	1
1.1 背景と目的 1.2 従来研究の課題	1 1
2. 溶融ワイヤの仕様と設置	2
2.1 溶融ワイヤの仕様 2.2 溶融ワイヤの設置場所	2 6
3. 溶融ワイヤの取出し	8
 3.1 取出し装置の作製 3.2 取出し装置の取扱 3.3 保管容器の取扱 	
 溶融ワイヤの観察方法と結果 	15
4.1 観察方法 4.2 観察結果	15 16
5. 結論	
謝辞	
参考文献	

Contents

1. Intro	oduction1
1.1	Background and purpose1
1.2	Previous research
2. Spec	cification and location of melt wire
2.1	Specification
2.2	Location
3. Sam	pling of melt wire
3.1	Fabrication of taking out device
3.2	Handling of taking out device
3.3	Handling of storage container
4. Obse	ervation method and result
4.1	Method
4.2	Result
5. Con	clusion
Acknow	wledgement
Refere	nces

1. 序論

1.1 背景と目的

原子炉の研究開発において、スケールアップされた段階ごとに様々な工学値を実測し、最適評価値を得るための設計技術を向上させることは、最終的に動力炉の安全性と運転性能の向上に役立つ。特に高温ガス炉では、燃料温度や炉内の制御棒等の温度の評価が炉の性能を支配し、これらの温度測定技術の開発は設計技術高度化に向けて重要である。

日本の所有する高温ガス炉である高温工学試験研究炉(High Temperature engineering Test Reactor: HTTR)では、実炉を建設する前に、各種の試験装置を用いて設計の妥当性を検証している。特に大型構造機器実証試験ループ(HENDEL)によって制御棒や炉内構造物の健全性に関する研究が行われ、HTTRの詳細設計に反映されている[1]。さらに運転を開始した後に、様々な解析条件を実測されたプロセス値に置き換えて制御棒の温度解析が行われたものの[2]、予測した制御棒本体の温度は、これまで測定出来ていなかった。

そこで本研究では、炉内機器の温度解析技術の高度化に資する知見を得ることを目的として、 炉内構造物のうち制御棒の先端部に融点の異なるワイヤ状の合金(以下、溶融ワイヤと記す)を設 置し、原子炉を一定期間運転した後に取出し、溶融状態を確認することで、制御棒が使用中に到 達した最高温度を測定することとした。

1.2 従来研究の課題

高温ガス炉研究の初期から、熱電対等の挿入が困難な高温の場の温度を計測するため、複数種の 合金を装荷して溶融状態から到達温度を推定する手法が検討されている。1960年代には米国の高温 ガス炉のテストリアクターである Peach Bottom 炉の燃料領域の温度計測を目的として、溶融ワイヤと黒 鉛の共存性等が検討され、実験されている[3][4]。またドイツでは溶融ワイヤを内蔵した黒鉛球を燃料 球と同様に AVR の炉内に装荷し、燃料領域の最高温度の測定を実験的に実施している。Peach Bottom 炉における溶融ワイヤの成果は公開されているものがないが、AVR における実験データは公 開されており、ペブルベッド型高温ガス炉の燃料球が、当初設計よりも高い温度になりえることを明らか にしている[5]。しかしながら、AVR で使用された溶融ワイヤは合金ワイヤの被覆石英管の破損や溶融 状態が明確に判断できないケースがあり、測定装置としての精度に課題があった。そこで HTTR では、 AVR で用いられた溶融ワイヤから、合金の組成を変更して測定精度を高め、さらに取扱中に機械的な 衝撃から保護する構造が求められた。

2. 溶融ワイヤの仕様と設置

2.1 溶融ワイヤの仕様

溶融ワイヤは、図1に示すように石英ガラスの中に融点の異なる合金ワイヤを封入したものである。石英ガラス内には、不活性アルゴンガスを封入する。溶融ワイヤは、円柱状のアノミナホルダに 挿入後、制御棒の先端に設けたショックアブソーバに12個収める(図2参照)。アルミナホルダは 寸法の小さい溶融ワイヤを、マニュピレータで取り扱える大きさにするとともに、運転中の溶融ワイ ヤを保持する役割を持たせる。また制御棒の取扱い時の揺れや振動に加え、原子炉スクラム時に 自重落下する制御棒から溶融ワイヤが飛出さないよう、アルミナホルダの上に同材質,同径のアル ミナを置く。原子炉の運転,停止を伴う各種試験を実施した後、本溶融ワイヤを制御棒から取出し、 目視もしくはX線撮影により溶融状態を確認し、運転中に曝された最高温度を判定する。溶融ワイ ヤ用の合金を選定するに当たっては、温度領域(約 600~1400℃)に融点を持った金属又は合金 のうち、以下の観点から選定することとした。選定した合金を表1に示す。なお実際に制御棒のシ ョックアブソーバに設置した溶融ワイヤの温度領域は、制御棒の最高使用温度(特に、出力上昇試 験時の商用電源喪失試験等におけるスクラム時制御棒先端温度)を考慮して、410℃から 1000℃ とした。

・金相的に単純

- ・金属間化合物を作らない
- ・低蒸気圧
- ・液相線と固相線の温度差が小さい
- ・石英ガラスと反応しない
- ・溶解及び加工性が良い
- ・耐放射線性がある

ワイヤの直径及び長さは図 3 に示すように、それぞれ約 0.5mm、約 5mm とし、石英管は溶融 ワイヤより一回り大きい構造とし、X 線による観測で溶融の有無、すなわち溶融したワイヤが丸くな ることの目視確認ができるようにする。溶融ワイヤ用石英ガラス管は、長さ約 10mm、外径約 1.5mm で、管厚 0.3mm であり、溶融した合金が丸くなるための空隙を、石英管内面と溶融ワイヤ の間に約 0.2mm 程度確保する。ワイヤの製作及び石英ガラス管への封入を含めた溶融ワイヤの 作製手順を図 4 に示す。アルミナホルダは Al₂O₃ 製であり合金ワイヤを封入した石英ガラス管が 周囲の黒鉛と直接接触することを防止するとともに、ワイヤの種類等をホルダ表面に記入した記号 で識別できるようにしている.



図 1 溶融ワイヤおよびショックアブソーバの概略構造



図 2 制御棒先端のショックアブソーバの詳細構造



図3 溶融ワイヤと石英管の外形図



図 4 溶融ワイヤ作製手順

		_ 阳弘示
No.	合金元素と重量比(wt%)	融点
1	Bi/Sb = 80/20	410°C
2	Bi/Sb = 72.5/27.5	435°C
3	Bi/Sb = 63/37	480°C
4	Bi/Sb = 55/45	505°C
5	Ag/Ge = 81.5/18.5	$651^{\circ}\mathrm{C}$
6	Ag/Ge = 86/14	710°C
7	Ag/Cu = 72/28	779°C
8	Ag/Cu = 87.5/12.5	850°C
9	Ag/Cu = 95/5	910°C
10	Ag = 99.99	960°C
11	Ag/Au = 82/18	980°C
12	Ag/Au = 66/34	1000°C

表 1 選定した溶融ワイヤの組成と融点

2.2 溶融ワイヤの設置場所

溶融ワイヤは制御棒の先端に設けたショックアブソーバに設置する。HTTR の原子炉断面と制 御棒の構造概略図を図 5 に示す。HTTR の圧力容器の水平断面図を図 6 に示す。HTTR の燃 料領域は六角柱状の黒鉛ブロックが鉛直方向に積み重ねられており、黒鉛ブロックは燃料体カラ ム、制御棒案内カラムから成る。燃料領域の周りには可動反射体領域があり、その側面に固定反 射体がある。HTTRの制御棒は2本が1対となり、圧力容器上鏡のスタンドパイプ内に配置された 制御棒駆動装置により引き抜き、挿入される。制御棒は B4C と黒鉛の混合焼成体から成る制御棒 要素と、制御棒が落下した際の衝撃を吸収するショックアブソーバ、そして制御棒を吊り下げる連 結棒および支持板とワイヤロープにより構成される。溶融ワイヤを設置する制御棒は、燃料領域、 反射対領域に合計16対ある制御棒のうち、図 6に示す10対とする。なお本報で観察する溶融ワ イヤは図 6に示すように、可動反射体領域のうち、燃料領域に近いリング2と呼ぶ制御棒群の中の 一本とした。



図 5 HTTR の原子炉断面と制御棒先端の溶融ワイヤ設置場所



3. 溶融ワイヤの取出し

3.1 取出し装置の作製

原子炉内から取出された溶融ワイヤは原子炉内の放射線照射を受けて放射化しているため、ショックアブソーバから取出した直後は高い線量を有する。また放射化しているのは溶融ワイヤだけでなく、制御棒全体が放射化しているため、溶融ワイヤの取出し作業はHTTR原子炉建家内のメンテナンスピットと呼ぶ部屋でマニュピレータを用いて遠隔で行う。メンテナンスピット内の機器配置を図7に示す。制御棒は燃料取扱フロアから制御棒交換機を用いてメンテナンスピットに降ろす。メンテナンスピット上部の架台で制御棒駆動装置を保持した後、電源を接続し、制御棒を降下させる。メンテナンスピット下部に制御棒先端部を降下させた後、模擬流路管の上に置かれた溶融ワイヤ取出し装置をマニュピレータで操作し、制御棒要素とショックアブソーバのギャップを広げ、溶融ワイヤを取出す。溶融ワイヤ取出し装置は、マニュピレータで操作するため、簡素な取り扱いが求められる。そこで本作業を実施するにあたり、専用の取出し用装置を作製する。



図 7 メンテナンスピット内の機器配置

溶融ワイヤ取出し装置は、この溶融ワイヤを取出し、溶融ワイヤの評価・解祈までの間、保管するものである。本装置は、溶融ワイヤ取出し装置本体と溶融ワイヤ保管容器からなる。溶融ワイヤ取出し装置本体は、下部の複数段の制御棒要素を持ち上げてショックアブソーバと制御要素との間隔を広げる昇降機構と、ショックアブソーバ内の溶融ワイヤを下方から押し出す機構を有する。溶融ワイヤ保管容器は、取出した溶融ワイヤを収納するための蓋付きの箱型形状をなしている。これらは、燃料交換機メンテナンスピットに設置されているマニュピレータを用いて遠隔で取り扱う。図8に溶融ワイヤ取出し装置本体概略図を、また図9に保管容器構造図を示す。本装置を構成する部位の構造、機能は次の通りである。

(1)制御棒押上げ爪昇降機構

ショックアブソーバと制御棒要素は、制御棒の連結棒に取付けられている支持板に支持されている。制御棒押上げ爪は、ショックアブソーバの内側を上昇し、ショックアブソーバに設けられている る孔を通して制御棒要素のみを押し上げる形状となっている。制御構押上げ爪昇降機構は、手動 ハンドルの回転により制御棒押し上げ爪を上下駆動させる。

(2)押し棒昇降機構

ショックアブソーバ内の溶融ワイヤ収納部には、下部に孔が設けられている。下方からこの孔に 細径の押し棒を挿入すると、溶融ワイヤを囲むアルミナホルダがショックアブソーバ内から上方に 押し出される。押し棒昇降機構は、手動ハンドルの回転により、押し棒を上下駆動させる。押し棒昇 降機構は、制御棒押上げ爪昇降機構に取り付けられている。

(3)保管容器

保管容器は、放射化されている溶融ワイヤを保管するもので、遮へいを考慮して板厚 30mm と した蓋付き箱型形状のステンレス製容器である。内部には複数の凹み部を有し、それぞれに取出 された溶融ワイヤが収納されるようになっている。

溶融ワイヤを保管容器に移動、収納するための付属品として、ショックアブソーバの上方に押し 出された溶融ワイヤを保持する取出し用ホルダ、溶融ワイヤを収納するための溶融ワイヤ押し棒を 含む。





3.2 取出し装置の取扱

溶融ワイヤは以下の手順で取出した。図 10 に溶融ワイヤ取出し手順の概要を示す。

- 1. 溶融ワイヤ取出し装置本体を制御棒模擬流路管上に設置する。このとき取出し装置本体の 「ジャッキ」と「押し棒」は下限位置にしておく。(図 10 の(a))
- 保管容器、取出しホルダ、ホルダ台等の冶具類を配置する。保管容器の蓋を開けて配置する。(図 10 の(a))
- 3. 制御棒をメンテナンスピットに据付け、制御棒を制御棒案内管下面から約 150mm の位置 まで下降させる。(図 10 の(a))
- 4. 模擬流路管を上昇して、制御棒「押上げ爪」をショックアブソーバ下端に近づける。(図 10 の(b))
- 5. 「ジャッキ」を上昇させて制御棒「押上げ爪」をショックアブソーバ内に挿入して行く。芯がず れているとショックアブソーバが傾く。その際は制御棒を軽くゆするか位置合せを行う。(図 10の(b))
- 6. 「押上げ爪」がショックアブソーバ内に入り、さらに上昇を続けると「押上げ爪」はショックアブ ソーバを貫通して上昇する。(図 10 の(b))
- 7. さらに「ジャッキ」を上げて制御棒下端要素を押上げ、ショックアブソーバ上端と制御棒下端 のギャップを約16~18mm 程度にする。(図 10 の(b))
- 8. マニプレータで「取出しホルダ」を「押し棒」上のショックアブソーバと制御棒の間に位置を 合わせてセットする。(図 10 の(c))
- 9. 「押し棒」駆動ハンドルを回して、「押し棒」を所定の位置まで上昇させて飛出し防止ピース を「取出しホルダ」に挿入する。(図 10 の(c))
- 10. 次いで「取出しホルダ」をずらしてセットし、「押し棒」を再度上昇して溶融ワイヤを「取出しホ ルダ」内に挿入する。(図 10 の(d))
- 11. 「取出しホルダ」を取出して、保管容器の所定位置に置き、押し棒を用いて飛出し防止ピースと溶融ワイヤを収納箱の穴に入れる。このとき予め所定の位置にホルダ台を設置しておく。 (図 10 の(e))
- 12. 2番目の溶融ワイヤの取出しに掛かる。このとき、装置本体は同じ位置でショックアブソーバ 側を 30 度回転させる。(図 10 の(a))
- 13. 上記の手順を繰り返し、溶融ワイヤの取出しを行う。



3.3 保管容器の取扱

ショックアブソーバから取出した溶融ワイヤを、保管容器に収納する手順(図 10 の(e))の概要は 以下のとおりである。以下の手順で取出した。図 10 に溶融ワイヤ取出し手順の概要を示す。

- 1. 予め保管容器にセットしておいたホルダ台に、溶融ワイヤ類を挿入した「取出しホルダ」を ホルダ台上に設置する。
- 2. 「取出しホルダ」に保持されている溶融ワイヤ類(飛出し防止プラグと溶融ワイヤ)を、溶融 ワイヤ押出し棒で押込み保管容器内に落し込む。
- 3. ホルダ台を次の収納穴位置にセットする。
- 4. 以下、上記 1~3の操作を繰返して、溶融ワイヤ類を保管容器内に収納する。
- 5. 保管容器に全ての溶融ワイヤ類が収納されたのを確認後,容器の蓋を閉める。
- 6. 2箇所のクランプを持上げ回転させ、ハンドル部をまわして蓋を固定保持する。

4. 溶融ワイヤの観察方法と結果

4.1 観察方法

第3章に記した溶融ワイヤの取出し装置を用いて取出した溶融ワイヤの外観を観察し、溶融状態の確認を行った。本研究で観察した溶融ワイヤはリング2制御棒から取り出した。HTTRの炉心部の黒鉛は約1300℃と非常に高温であるため、原子炉スクラム時であっても制御棒の熱的な損傷を抑制する必要がある。そこでHTTRにおいて原子炉をスクラムする際は、まず反射体領域の制御棒を挿入して常温で未臨界を維持する制御棒2段階挿入方式を採用している。よって、燃料領域の制御棒よりも反射体領域の制御棒の方が高温にさらされるため、スクラム時の到達温度は高くなる可能性がある。さらに反射体領域の制御棒であっても炉心からの距離が近く、より高温となる可能性のあるリング2制御棒から溶融ワイヤを採取することとした。

HTTR ではこれまでに商用電源喪失事故を模擬して、原子炉出力 100%時からスクラムさせる 商用電源喪失試験を2度実施した。制御棒は、この試験実施時に、履歴上最も高い温度で使用さ れたこととなる。そこで商用電源喪失試験後の原子炉停止時に、制御棒を炉外に取出し、制御棒 先端のショックアブソーバから溶融ワイヤを取出し、溶融ワイヤをデジタルカメラで撮影し、溶融状 態を確認した。使用したカメラは Canon EOS M3 と EF-M28mm F3.5 マクロ IS STM レンズで ある。被写体となる溶融ワイヤは主として合金成分である放射化した Ag が線源となっており、電離 箱式サーベイメータ(日立アロカメディカル製 ICS・311)による 1cm 線量当量率は, 試料から 5cm の位置で約 100 μ Sv/h ほどであったが、放射線によるノイズやエラーの発生等の問題はなかっ た。

4.2 観察結果

炉内に装荷していない状態の溶融ワイヤの例を図 11 に示す。炉内に装荷していない溶融ワイ ヤは 12 種類ともに外観上の違いはなく、総じて図 11 の例と同様に銀色の金属光沢をもつ。 取出 した溶融ワイヤを撮影した写真を図 12 に示す。 図中では、石英管の輪郭を白線で、溶融ワイヤの 輪郭を赤線で示している。 しかし炉内で加熱された溶融ワイヤには、外観上融点に達していない 溶融ワイヤも一様にくすみや石英管内の汚れなどが生じていた。

図 12 に示すように、制御棒から取出した溶融ワイヤのうち、明確に融点に達していることが確認 できたのは、融点 410℃から 505℃までの 4 種類の溶融ワイヤであった。 融点 651℃の溶融ワイヤ は湾曲が生じているものの、溶融状態は確認できなかった。 またそれ以上の融点をもつ溶融ワイ ヤは湾曲もなく、すべて外観上の有意な変形は確認できなかった。 以上の結果、制御棒先端部の ショックアブソーバの到達温度は 505℃以上、651℃以下ということが明らかになった。

なお制御棒は、所定の使用条件を満足しない事象が生じた場合には、原則として使用期間にか かわらず交換することとしている。制御棒の使用条件については、制御棒の構造解析、実験、およ び材料の強度データ等[7]に基づき定めているが、異常な過渡に対して繰り返し使用の条件となる 使用温度については、素材であるAlloy800Hのデータから900℃以下で使用することとしてい る[8]。過去に高田らが行ったHTTRのスクラム時の温度・圧力等の実測を基にした制御棒温度の 解析では、通常のスクラム時には、制御棒温度は高くとも820℃程度であり、900℃には至らないと 評価されていた[2]が、本研究で行った溶融ワイヤの観察により、それを支持する結果を得ることが できた。



図 11 炉内に装荷していない溶融ワイヤの外観



図 12 リング 2 制御棒から取出した溶融ワイヤの外観(1/2)



図 12 リング2制御棒から取出した溶融ワイヤの外観(2/2)

5. 結論

本研究では、制御棒の先端部にあるショックアブソーバに溶融ワイヤを設置し、出力約 100%時から原子炉スクラムさせた後に溶融ワイヤを取出し、溶融ワイヤの状況を確認した。その結果、制御棒の先端部は505℃から651℃の範囲であり、最高使用温度の制限値である900℃を十分下回る範囲で使用できていることがわかった。

溶融ワイヤの外観から何ら異常が見られず、より高温の構造物の温度測定においても、本研究 で用いた溶融ワイヤの製造方法が適用できることが分かり、溶融ワイヤを用いた温度計測技術を 開発に成功した。

今後の炉内構造物の温度解析を行い、さらに石英管内部に析出している物質から制御棒先端 部ショックアブソーバの到達温度の推定を試み、炉内構造物の温度解析手法の高度化を目指す。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂いた 沢和弘 高温工学試験研究炉部長、伊与 久達夫 氏に深く感謝いたします。

参考文献

- Y. Tachibana, H. Sawahata, T. Iyoku, and T. Nakazawa, "Reactivity control system of the high temperature engineering test reactor," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 233, no. 1-3, pp. 89-101, 2004.
- [2] 高田英治,藤本望,松田淳子,中川繁昭,"HTTR原子炉スクラム時の制御棒温度解析; 商用電源喪失試験の実測データに基づく評価," JAERI-Tech 2003-040, 23p, 2003.
- [3] U.S. Atomic Energy Commission, Salgado, P. G. et al., Grooved melt wires, US patent 3527098A, 1970.9.8.
- [4] G. B. Engle, "Irradiation of B₄C-Graphite Capsules (GA-032-1A1 AND-2A2),"
 General Atomic Div., General Dynamics Corp., San Diego, Calif., 1964.
- H. Gottaut and K. Krüger, "Results of experiments at the AVR reactor," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 121, no. 2, pp. 143-153, 1990.
- [6] R. S. Sen and C. F. Viljoen, "The re-evaluation of the AVR melt-wire experiment with specific focus on different modeling strategies and simplifications," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 251, pp. 306-316.
- [7] Y. Tachibana, S. Shiozawa, J. Fukakura, F. Matsumoto, and T. Araki, "Integrity assessment of the high temperature engineering test reactor (HTTR) control rod at very high temperatures," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 172, no. 1, pp. 93-102, 1997.

[8] 西口磯春, 橘幸男, 元木保男, 塩沢周策, "高温工学試験研究炉の制御棒構造設計の考 え方," *JAERI-M 90-152*, 31p, 1990.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例					
AI 立長 SI 組立単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m ²				
体 積 立方メートル	m ³				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数 毎メートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²				
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度					

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称		記号	SI 単位で表される数値		
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	11		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
/3	Ц		9			(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$